

熱と電力間の相互変換に基づく光電デバイスの各種 効率 測定と太陽電池融雪等への応用に関する研究

著者	齋藤 輝文, 伊藤 由平, 長沼 拓海, 川名 拓実, 竹村 喜寿, 杉山 丞, 鳥居 彰夫, 木村 吉宏
雑誌名	EOS
巻	33
号	1
ページ	71-80
発行年	2021-02-26
URL	http://id.nii.ac.jp/1241/00000096/



令和元年度学内公募研究（実用化型）
〔研究論文〕

熱と電力間の相互変換に基づく光電デバイスの各種効率 測定と太陽電池融雪等への応用に関する研究

齋藤 輝文¹⁾, 伊藤 由平²⁾, 長沼 拓海²⁾, 川名 拓実²⁾
竹村 喜寿³⁾, 杉山 丞³⁾, 鳥居 彰夫⁴⁾, 木村 吉宏³⁾

Researches on Efficiency Measurements for Optoelectronic Devices Based on Conversion Between Heat and Electricity, and Its Application to Snow Melting for Solar Cells

T. SAITO¹⁾, Y. ITO²⁾, T. NAGANUMA²⁾, T. KAWANA²⁾,
Y. TAKEMURA³⁾, S. SUGIYAMA³⁾, A. TORII⁴⁾, Y. KIMURA³⁾

Abstract

Conversion efficiencies of optical devices, both sources and receivers have been measured based on a calorimetric method. Radiant power output of a source can be evaluated by subtracting a heat power from the applied electrical power while radiant power absorbed by a receiver can be evaluated by adding a heat power to the generated electrical power. The technique was validated firstly in the solar cell internal conversion efficiency measurements in a manual operation. To automatize the operation, a negative feedback control circuit to maintain constant temperature by adjusting the electrical power to the heater has been developed and proved to work successfully. Carbon nanotubes (hereinafter abbreviated as CNT) fabric heaters are used not only for the efficiency measurements system but also for snow melting purposes. Demonstration experiments using the CNT heaters attached to the back surface of a photovoltaic power generation panel, a hut roof, and a rain gutter, were conducted to melt the snow. Promising results have been obtained for both experiments.

1) 東北工業大学 工学部 環境エネルギー学科

Department of Environment and Energy, Faculty of Engineering, Tohoku Institute of Technology

2) 環境エネルギー学科令和元年度卒業生

Ex-student graduated in fiscal year 2019 from Department of Environment and Energy, Faculty of Engineering, Tohoku Institute of Technology

3) ㈱タニタハウジングウェア

Tanita Housingware Co., Ltd.

4) ㈱Fabtech

Fabtech Co., Ltd.

1 背景と目的

半導体のpn接合は、整流作用、電界発光、光発電等有用な性質が複数あるため、身近な所で無数に使われており、現代生活においては不可欠の存在となっている。ほぼすべての電子機器は直流で動作するため、一般家庭に來ている交流を直流に変換するための電源回路には必ず整流作用を持つダイオードが使われている。pn接合の電界発光を利用する発光ダイオード(LED)は省エネ性能が高いため、電球・放電灯(蛍光灯を含む)等既存の照明器具を駆逐する勢いで導入が進んでいる。LEDは電気エネルギーを入力として光エネルギーを出力するデバイスであるが、その逆向き、すなわち光エネルギーを入力として電気エネルギーを出力するデバイスが太陽電池(あるいは光検出器のフォトダイオード)である。これもpn接合でできており、近年、有望な再生可能エネルギー源として急速に普及が進んでいる。これら光電デバイスの変換効率は、性能評価に不可欠な第一の指標として、その測定が欠かせない。

太陽電池について、通常言われる変換効率は厳密には外部変換効率と呼ばれる量であり、入射放射束(W単位で表される電磁波の強さ)に対する発生電力の比として定義される。その測定法についてはIECの国際規格¹で定められおり、太陽光の放射照度やスペクトルは厳密に定義され、また太陽光は太陽電池表面へ垂直で入射させるよう規定している。分子の電力が容易に測定できる一方で、分母の入射放射束は、規定のスペクトルを用いて精密に測定する必要があるため、信頼に足る効率測定は世界中でも数箇所の認証機関に限定されている²。

実際の太陽光発電パネルの多くは、地面に固定されており、太陽位置が時々刻々変化しているため、入射角も時々刻々変化している。入射角が0度でない場合の効率についての情報はほとんどない。また現実の太陽光の放射照度やスペクトルも天候や大気の高濁度等によって大きく変化し、国際規格で定められた標準太陽光条件からの逸脱が出力電力に与える影響の評価は容易ではないため、現実の太陽光についての変換効率の測定も困難である。

従来の方でで求まる太陽電池あるいは光検出器の変換効率、応答度あるいは量子効率は、すべて分母の光入力が入射する放射束・光子束とする、外部という形容詞が付く量(外部量子効率等)である。これに対し本質的に重要性が高い量は、分母の光入力を吸収する放射束・光子束とする、内部という形容詞が付く量(内部量子効率等)である。この両者の違いは、反射率と透過率が0でないことによって生じる。従来の評価法では、標準太陽電池を用いて入射放射束を評価することによって、始めに外部変換効率を決定し、その後、反射率・透過率測定を実施することにより、内部変換効率を求めるという手順であり、後者の量は間接的な測定とならざるを得なかった。

これが熱的な測定を行うことによって、太陽電池(あるいは光検出器)の内部変換効率(内部応答度)を直接求めることが可能となる。熱的な効率測定の原理と方法の概略をFig. 1に示す。太陽電池を例にすると概略次の通りである。太陽電池が光を受けると、一部が反射あるいは透過で失われ、残りが太陽電池自体で吸収され、その一部が電力となって外部へ流出し、残りは損失として熱になる。この熱出力を電力で置換する手法により吸収放射束 P_a を評価し、負荷に供給される電力を P_o とすると、太陽電池の内部変換効率は $P_o / (P_o + P_a)$ によって直接決定することができる。この原理に基づき1983年に井上らが、単色のレーザ光を受光するフォトダイオードについて、熱的な測定により吸収光子束を求

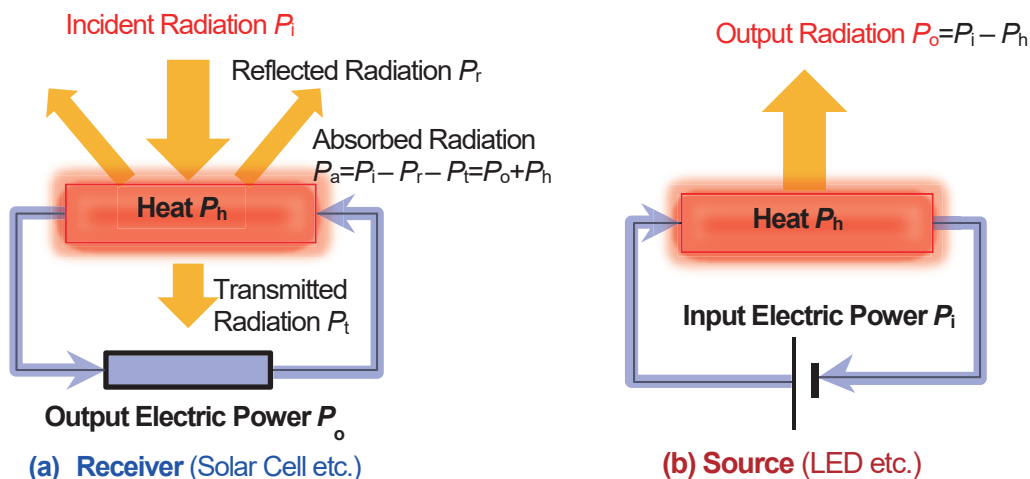


Fig. 1 Schematic diagrams to show the principle of thermal power evaluation substituted by electrical power for an optical receiver and a source.

め、フォトダイオードの内部量子効率を求める測定を初めて行った³。その後他グループを含め報告例が途絶えている状況にあったが、我々は近年、太陽光発電パネル自体が放射束を吸収した結果発生する熱出力を電力で置換する手法により吸収放射束を評価し、太陽電池の内部変換効率を直接決定することに世界で初めて成功した⁴。本研究の手法では吸収熱を電力で置換するという原理を用いるため、仮に標準条件から逸脱した分光分布や強度、さらには斜入射であっても正確に吸収放射束を決定でき、本質的に重要な内部変換効率を直接測定できる利点を持つ。

太陽電池についての熱を電力で置換する具体的な方法は次の通りである。光入力を遮った状態で、太陽光発電パネルへ順方向に通電し、太陽電池に外部から電力を加えてヒータとして動作させ、光照射時の温度と同じになるように電力を調整することにより、熱を電力で置換する。すなわち、その電力が吸収した放射束として求められるという手法である。本手法により、太陽電池等受光デバイスの内部量子効率、内部変換効率を、追加測定をすることなく直接求めることができるのが大きなメリットである。

本研究では、電力置換の動作を負帰還回路を用いて自動化する試みを実施した。そのポイントは、常に一定温度を保つ恒温制御である。その方式として、温度センサとヒータを別個にする方式に加えて、温度センサとヒータを兼用する方式も試みた。

熱的な効率測定では受光デバイスだけではなく、発光デバイスも可能である。負帰還回路において、時間的応答が遅いと問題であるので、本研究では、時定数を小さくするため、熱容量を小さくしてまず動作の原理実証を優先することとした。とりあえず評価対象とした受光デバイスは小型のアモルファス Si 太陽電池、発光デバイスは RGB タイプの LED である。

電気から熱への変換は、上記例で取り上げた pn 接合以外に一般的なヒータによって容易に実現できるが、本研究では、ニクロム線等これまでの線状の金属ヒータに比べ、温度むらのない様な温度分布に加え、任意のサイズ・形状の曲面で発熱体を構成できる特徴を持つ(株)Fabtech 製カーボンナノチューブ織物状発熱体（以下 CNT 発熱体と略記）を主要なヒータの一つとして位置づけ、太陽電池の効率測定での電力置換用ヒータとしても用

いた。このときの熱のパワー密度は 10 mW/m^2 程度と微弱である。

この同じCNT発熱体を用いて、パワー密度を効率測定の場合より桁違いに大きくして、太陽光発電パネルの融雪への応用することを第二の目的とした。ちなみに大曲においては、既に太陽光発電パネルの順方向へ通電することによって発生するジュール熱により雪を滑り落とす実証実験を実施し、ほぼ目的通りの成果を上げた^{5,6}。ただ滑り落とすだけでは雪の捨て場に困る上、落雪のリスクがあるため、完全融雪のニーズが高いことから、専用のヒータを用いる完全融雪を志向することとした。

CNT発熱体については、既にその特性評価を行い、負の温度係数（金属ヒータとは反対）を持つことを明らかにしている。この場合、定電圧電源で通電すると、発熱→抵抗減少→電力増加→さらに発熱という正帰還になり、原理上熱暴走のリスクあるため、これを回避する必要がある。そのため本学齋藤研究室では、定電流通電に加え、温度センサなしで恒温制御を行う回路方式を考案し、期待した通りの安定動作をすることを既に確認している⁷。

本研究の目的を要約すると次の通りである。熱と電力間の相互変換の原理と手法を用いて、以下の研究を実施する。

1. 齋藤研で開発した、熱を電力で置換することによって太陽電池内部変換効率を直接測定する手法を、負帰還回路によって自動化を図り、受光デバイスに加えて発光デバイスについても変換効率の測定ができる方法の開発を行う。
2. 豪雪地である大曲（株）タニタハウジングウェア秋田工場内敷地）において、実用レベルの規模で、カーボンナノチューブ繊維物状発熱体を太陽光発電パネルの裏面に張り付け、積雪を融雪する実証実験を行って最適化を図る。

2 熱を電力で置換する手法による効率測定

受光・発光の両光電デバイスの変換効率を、前節に記載のように熱的に測定できる。

受光デバイスの場合、Fig. 1にあるように吸収放射束 P_a は、出力電力 P_o と電力置換で求まる熱パワー P_h の和となるので、その内部変換効率 $C_{r,int}$ は次式で与えられる。

$$C_{r,int} = \frac{P_o}{P_a} = \frac{P_o}{P_o + P_h} \quad (1)$$

追加測定により反射率 R と透過率 T がわかれば吸収率 A は $1 - R - T$ であるので、受光デバイスの外部変換効率 $C_{r,ext}$ は、次式で与えられる。

$$C_{r,ext} = AC_{r,int} = (1 - R - T)C_{r,int} \quad (2)$$

一方、発光デバイスの場合、Fig. 1にあるように出力放射束 P_o は、入力電力 P_i から電力置換で求まる熱損失パワー P_h を引いたものとなるので、その外部変換効率 $C_{s,ext}$ は次式で与えられる。

$$C_{s,ext} = \frac{P_o}{P_i} = \frac{P_i - P_h}{P_i} \quad (3)$$

発光デバイスにおいて一度発光してから内部で吸収が発生する場合の熱は、始めから発

光しないで生じるジュール損失と区別ができないので、厳密な意味での内部変換効率の測定は困難である。発光した光の内部での吸収率が無視できるとした場合、透過率（外部取り出し効率）を T とすると、発光デバイスの内部変換効率 $C_{s,int}$ は、次式で与えられる。

$$C_{s,int} = \frac{C_{s,ext}}{T} \quad (4)$$

光電デバイス変換効率の熱的測定法に関して、手動動作の電力置換により太陽電池内部変換効率の直接測定を実施し、その原理と結果の妥当性は確認済みである⁴。本研究では、電力置換を手動ではなく、負帰還回路を用いて自動化することを目的とし、そのために必要となる基本的な特性（ヒータとしてのCNTヒータ・太陽電池の電流電圧特性、それらの温度依存性、光電デバイスとしてRGB型LEDの電流電圧特性等）も測定したが、紙面の制約のため割愛した。

2.1 受光デバイスの効率測定

太陽電池の変換効率を測定する上で必要となる、熱の電力置換を自動的に行うために使用した回路図をFig. 2に示す。この回路は、効率測定の対象であるアモルファスSi太陽電池（AM-1456）自身をヒータとして使用し、その背面に取り付けられた白金測温抵抗体（Pt1000）を温度センサとして使用して恒温制御を実現するように設計および製作した。

本回路は次のように動作する。受光部で光を吸収→受光部の温度上昇→受光部と熱的に結合してある温度センサ（Pt1000）の抵抗値増加→OPアンプ反転入力電位上昇→OPアンプ出力電位低下→太陽電池の自己加熱による熱出力減少。このように始めの変化を打ち消す方向に動作する。本実験では熱を電力に置き換えるために必要な恒温動作が、追加のヒータや熱電素子を使用せずに、テスト対象の太陽電池に順方向に電流を供給する点に特徴がある。

その効率測定の結果をFig. 3に示す。LEDがオフのとき、セルで消費される平均電力は約2.21 mWである。LEDがオンになると、LED光の吸収熱による温度上昇を相殺する

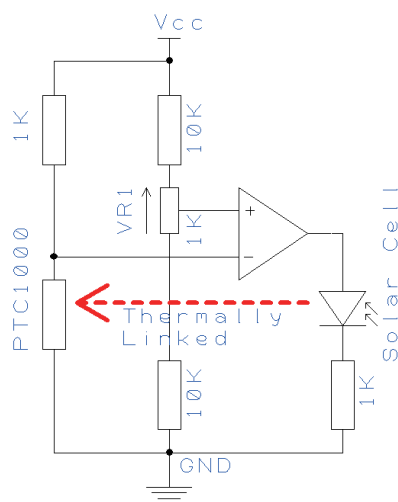


Fig. 2 Circuit for automatic electrical substitution with thermally linked negative feedback control.

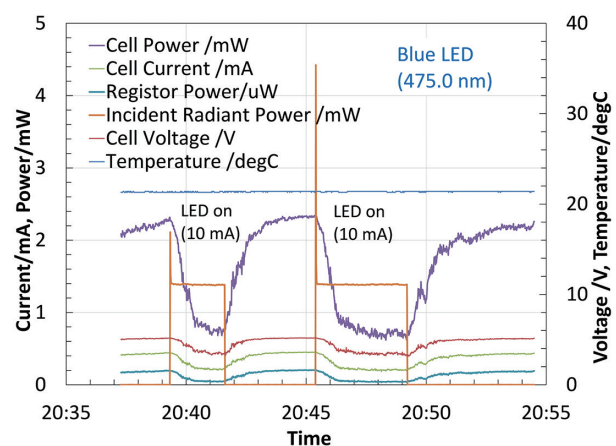


Fig. 3 Temporal change in temperature, electrical power, current, power applied and incident radiant power for a-Si cell under blue LED illumination.

ように、回路はセルに流れる電流を（消費電力も）自動的に減らして、同じ温度を維持する。このときセルで消費される平均電力は約 0.77 mW である。電力の差 1.44 mW が、吸収された放射束に等しいとみなせる。本実験では太陽電池表面に黒色塗料を塗布してあるため、反射率はほぼゼロであり、吸収放射束と入射放射パワーと等しいと見なすことができる。

一方、校正されたフォトダイオードで測定されたセルに入射する放射パワーは 1.39 mW であり、前者の熱的測定結果と 3.6 % の誤差で一致した。太陽電池の電流－電圧特性を測定して最大電力動作点を求め、同じ条件下での最大電力は 0.0638 mW であった。したがって、変換効率は $0.0638 \text{ mW} / 1.44 \text{ mW} = 4.4 \%$ と求まった。

2.2 発光デバイスの効率測定

恒温制御による熱の電力置換による方式を、発光デバイスの効率測定にも適用した。その対象とした RGB 型 LED（OptoSupply OSTCXBCBC1E）と裏面に貼り付けた白金抵抗測温体（Pt100）の写真を Fig. 4 に示す。

電力置換を自動的に行うための恒温制御は、先の受光デバイスの場合と異なり、白金抵抗測温体が温度センサ兼ヒータとして動作する負帰還制御回路を用いた。本回路は、Pt100 に印加される電力を自動的に調整して、一定の抵抗そして一定の温度を維持するように動作する。

赤色 LED（ピーク波長 624 nm）についての実験結果例を Fig. 5, Fig. 6 に示す。LED 点灯の on-off およびその通電電流の大小（LED-off を挟んで 10 mA, 5 mA, 15 mA へ順次変更）によって、恒温を維持するために必要なヒータ（本実験では、白金抵抗測温体がセンサー兼ヒータとして動作）への印

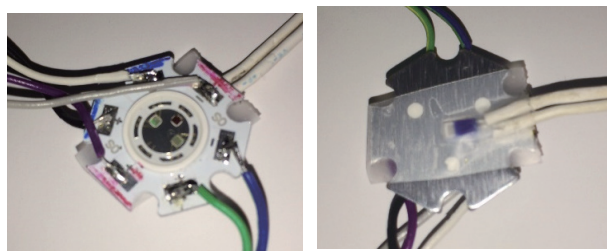


Fig. 4 Left: Photograph of front side of RGB type LED. Right: Platinum resistance thermometer, Pt100 attached to the backside of the LED.

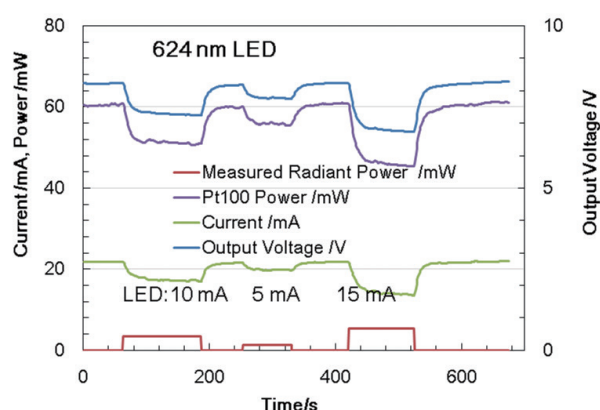


Fig. 5 Temporal change in measured radiant power, electrical power dissipated at Pt100, etc..

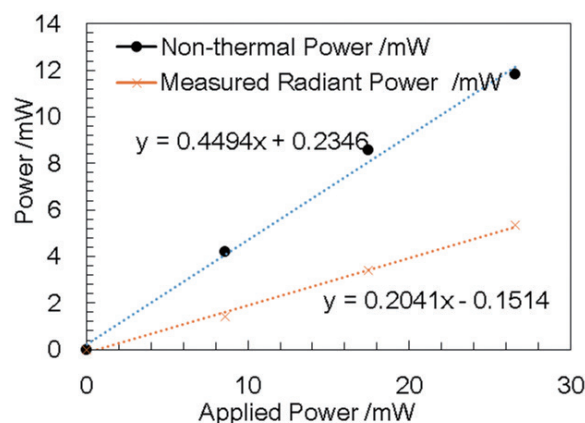


Fig. 6 Non-thermal power (input electrical power applied to the LED minus the thermal power difference) and independently measured radiant power.

加電力（紫曲線）すなわち置換電力が追従して変化している様子がわかる。置換電力は、LED 点灯の on-off に対応する印加電力の段差となる。

Fig. 6 において、黒点は LED に印加した電力から電力置換によって求めた電力（熱損失とみなされるパワー）を差し引いたパワー、橙色の線は校正済みのシリコン・フォトダイオード（S1227-1010BQ）によって求めた放射束である。期待通りの動作をしていれば、両者は一致するはずであるが、本測定によって求められた放射束および変換効率は約 2.2 倍過大評価していることを示している。その原因として、導線を伝って熱が逃げているのが考えられ、導線を熱伝導率の小さいものに変えての再実験を計画している。

3 太陽電池等融雪の実証実験

CNT 織物状発熱体を融雪目的に応用しての実証実験を、豪雪地として知られる秋田県大仙市大曲で実施した。公称最大出力 130W の屋根一体型多結晶 Si 太陽光発電モジュール「エコテクノルーフ」(ETR01SY, サイズ:1365 mm × 700 mm) 2 枚（面積:1.911 m²）からなるアレイ 2 組を方位角 182°（ほぼ南向き）、傾斜角 6°にて設置した。向かって左側の太陽光発電モジュール裏面に CNT ヒータを直接貼り付け（直接加熱）、右側の太陽光発電モジュール裏側には約 1 cm の空気層を挟んでブラック（非遮熱）塗装ガルバリウム鋼板下に CNT ヒータを貼り付けた（間接加熱）。

実験結果の一例（実験日：2019 年 12 月 6 日～12 月 9 日）を Fig. 7 に示す。両パネルの CNT ヒータは直流電源 INSTEK PSW 80-27 に並列に接続され、10 A の定電流で通電した。間接加熱の方が直接加熱よりも時間を要するものの、両方式ともほぼ同じ融雪効果があるのを確認した。

通電開始時（12 月 6 日 08 時 00 分）の電源電圧は、76.94 V、通電停止時（12 月 9 日 10 時 04 分）の電源電圧は 71.82 V であった。全期間中の両パネルの合計電力量は 55.09 kWh であったが、Fig. 10(c)からわかるように、約 50 時間後すなわち 1 アレイ当たり 19 kWh/1.9 m² = 10 kWh/m² 程度でほぼ融雪できている。同様の実験を複数回実施した結果、最大でも約 15 kWh/m² の電力量で完全融雪できることを確認した。滑雪の場合に必要な電力量 1.56 kWh/2.43 m² = 0.64 kWh/m² 程度⁶と比べると予想通りかなり大きいことがわかる。



(a) 2 hours 13 minutes after.



(b) 30 hours 3 minutes after.



(c) 47 hours 56 minutes after.

Fig. 7 Snow melting experiment at Oomagari. Left array: direct heating. Right array: indirect heating (CNT heater is placed on Galvalume steel plate with 1 cm air gap in front.).

上記太陽光発電モジュールのほか、小屋屋根と雨樋についても CNT ヒータによる融雪実験を行った。小屋屋根上面と右横樋に対向する上部覆いの内側裏面に温調器付き CNT ヒータを貼り付け、常時通電した。左横樋には CNT ヒータを貼り付けていない。縦樋には温調器なしで CNT ヒータを巻きつくように貼り付けて常時通電した。これらの実験結果の一例を Fig. 8 に示す。実験の結果、縦樋の CNT ヒータは常時通電しており、外気温との差は平均 5℃ 高かった。小屋屋根の CNT ヒータ電力 (Roof CNT Power) が激しく変動しているのは、温調器が付いているため一定温度を保つために必要な電力が周囲温度によって自動的に調整されるためである。これによって無駄な電力消費が避けられることがわかる。このシーズンの実験では暖冬のため、雨樋が凍結する事態は発生せず、ヒータの有無による差異は検証できなかった。

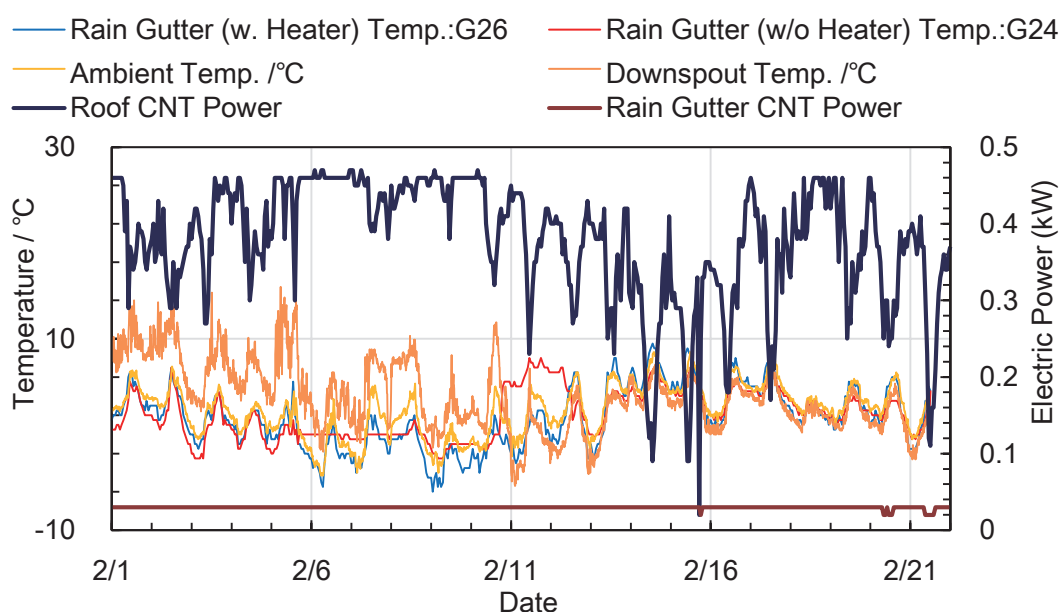


Fig. 8 Temporal change in temperature, electric power for a roof, rain gutters and a downspout etc..

4 まとめ

熱と電力間の相互変換の原理と手法を用いて、太陽電池に関する以下の研究を実施した。

1. 齋藤研で開発した、熱を電力で置換することによって太陽電池内部変換効率を直接測定する手法を、負帰還回路によって自動化を図り、受光デバイスに加えて発光デバイスについても変換効率の測定を行った。ヒータとして被測定対象の太陽電池、CNT 織物状発熱体、さらには温度センサ自身等、複数の方式の恒温制御動作を試みた。
2. 豪雪地である大曲（株）タニタハウジングウェア秋田工場内敷地）において、実用レベルの規模で、CNT 織物状発熱体を太陽光発電パネルの裏面、小屋屋根および雨樋（横樋および縦樋）に張り付け、積雪を融雪する実証実験を行った。

効率測定と全体に共通する事柄について、明らかとなった主な成果は以下の通りである。

- ・光電デバイス変換効率の電力置換による測定法を自動化するにあたって必須となる恒温制御に関して複数の方式を試み、次のすべてについて正常な負帰還による恒温制御

動作を確認した：温度センサとヒータを別個にする方式において、ヒータとして被測定対象の太陽電池，CNT 織物状発熱体を使用。温度センサとヒータを兼用する方式において，白金抵抗測温体，サーミスタを使用。

- ・ CNT 発熱体を用いて温度センサなしで恒温制御する負帰還回路により，温度係数の絶対値が小さい新型であっても，最大 1.4 kW/m^2 のパワー密度で期待通りの安定な恒温動作を確認した。なお効率測定用のヒータのパワーレベルは 10 mW/m^2 程度のパワー密度であるので，5桁を超える範囲で安定な動作を確認した。
- ・ 新旧2種類のCNT 織物状ヒータとも，金属と反対の負の温度係数を持つことを確認した。
- ・ CNT 織物状ヒータは金属と正反対の負の温度係数を持つため，定電圧動作では熱暴走するリスクが懸念されたが，その兆候は観測されなかった。ただし熱流束の変動が認められた。
- ・ 旧型 CNT ヒータに比べ，電極周辺をカーボン塗料で接触抵抗を減らした新型では，予想通り抵抗値が大きく減少していることが確認できた。
- ・ 電流電圧特性について，旧型はダイオードのような顕著な非直線性が認められたが，新型はほぼ直線の Ohmic に近い特性であった。
- ・ 受光デバイスであるアモルファス Si 太陽電池について，白金測温抵抗体（Pt1000）を温度センサとする恒温制御システムにより，変換効率を求めた結果，4.4 %と妥当であった。
- ・ 発光デバイスである赤 LED について，白金抵抗測温体を温度センサ兼ヒータとして動作する恒温制御システムによる測定の結果，放射束および変換効率を約 2.2 倍過大評価していることが判明した。原因としてヒータ電線からの熱伝導によって熱が流出していることが考えられる。熱伝導率の大きい材質に変更する等の対策をして再実験する予定である。

大曲での CNT 織物状発熱体を用いた融雪の実証実験について，明らかとなった主な成果は以下の通りである。

- ・ パネル上の融雪実験において，直接加熱，間接加熱の比較を行った結果，前者の方が幾分融雪の進行が速いが，いずれの方式でも融雪されることが確認できた。
- ・ 太陽光発電パネル上の融雪に関しては，約 30 cm の積雪量の場合，完全に融雪するのに要する単位面積あたりの電力量は約 15 kWh/m^2 であった。その電気代については， 27 円/kWh とすると約 420 円/m^2 ，融雪用電力 A（ 11 円/kWh ）を使用する場合は約 170 円/m^2 であることがわかった。ちなみに以前同地において滑雪の場合に必要な電力量として求めた 0.64 kWh/m^2 程度と比べると予想通りかなり大きいことがわかった。
- ・ 小屋屋根と雨樋の融雪用に CNT ヒータにサーモスタットを利用したの常時通電した状態で，交流電力計を用いて電力の計測を行った結果，サーモスタットによって，設定温度より高温時には無駄な通電が抑制されていることを確認した。

謝辞

本研究は東北工業大学研究支援センターの 2019 年度共同プロジェクト研究（実用化開発研究）の助成を受け，実施された。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1 IEC 60891: 2009 Ed 2 *Procedures for temperature and irradiance corrections to measured I-V characteristics of crystalline silicon photovoltaic (PV) devices*.
- 2 Osterwald C R, Anevsky S, Barua A K, Chaudhuri P, Dubard J, Emery K, Hansen B, King D, Metzdorf J, Nagamine F, Shimokawa R, Wang Y X, Wittchen T, Zaaiman W, Zastrow A, and Zhang J: *The World Photovoltaic Scale: An International Reference Cell Calibration Program*, NREL/CP-510-22942 UC Category: 1250.
- 3 T. Inoue and K. Yamamura, *Quantum efficiency measurement of a photodiode based on a calorimetric method*, J. Appl. Phys., 54, 6782-6784 (1983).
- 4 T. Saito, M. Tatsuta, Y. Abe and M. Takesawa, *Calorimetric Measurement for Internal Conversion Efficiency of Photovoltaic Cells/Modules Based on Electrical Substitution Method*, Journal of Physics: Conf. Series 972 (2018) 012019 ; doi :10.1088/1742-6596/972/1/012019.
- 5 齋藤輝文, 柴崎浩一郎, 武澤港斗, 初谷博, 味原真穂, 穴戸保範, 杉山丞: *屋根一体型太陽電池の通電加熱による除雪*, 東北工業大学地域連携センター紀要 (EOS) 28 (2015) 11-20.
- 6 齋藤輝文, 阿部孔明, 酢谷彪, 柴崎浩一郎, 武澤港斗, 初谷博, 瀧脇徳秋, 味原真穂, 穴戸 保範, 杉山丞: *屋根一体型太陽電池の通電加熱による除雪 II*, 東北工業大学地域連携センター紀要 (EOS) 29 (2016) 23-31.
- 7 齋藤輝文, 今野友貴, 土屋薫生, 初谷博, 竹村喜寿, 杉山丞, 鳥居彰夫, 木村吉宏: *カーボンナノチューブ繊維状発熱体の太陽光発電分野への応用に関する研究*, 東北工業大学地域連携センター紀要 (EOS) 32 (2020) 29-38.